

УДК 004.9

ОБНАРУЖЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫМ АНОМАЛИЯМ В ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯХ*

С. М. Борзов

*Институт автоматизи́ки и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: borzov@iae.nsk.su*

Разработаны программно-алгоритмические средства обнаружения малоразмерных динамических тепловых объектов на основе поиска пространственно-временных аномалий в поле наблюдения по последовательностям изображений ИК-диапазона. Представлены результаты исследования эффективности реализованного метода на данных, полученных в условиях реальной фоноцелевой обстановки.

Ключевые слова: поиск динамических объектов, малоразмерные объекты, обработка тепловизионных видеопоследовательностей, пространственно-временные аномалии.

Введение. Для создания высокоэффективных мобильных комплексов обнаружения и распознавания целей необходимо оснащение приборов наблюдения функциями оперативной обработки данных, направленной на выделение в регистрируемых изображениях фрагментов, потенциально содержащих объекты интереса. Суть обработки состоит в анализе локальных пространственных признаков изображений и формировании в соответствии с некоторыми правилами цифрового массива, в определённой степени характеризующего вероятность наличия искомого объекта в различных точках наблюдаемой сцены. Решение же о выделении фрагментов принимается на основе сравнения значений отсчётов данного массива с порогом, устанавливаемым оператором или определяемым в результате обучения.

При этом, как показала практика, в реальных условиях (широкий диапазон изменения освещённости, значительная удалённость и неизвестные ракурсы объектов, существенные искажения атмосферы, разнообразный динамичный фон) методы, основанные на определении подобия анализируемых фрагментов и эталонных изображений обнаруживаемых объектов [1], оказываются недостаточно эффективными. Поэтому в данной работе предлагается применять подход, заключающийся в формировании описания фона для каждой сцены (в некоторой системе признаков, выбранной с учётом специфики объектов интереса) и последующем поиске фрагментов, параметры которых не соответствуют полученному описанию. Такой подход в литературе называется поиском аномалий [2] и является частным случаем «классификации без учителя» [3]. При его использовании в пространстве признаков с помощью кластерного анализа формируются области, соответствующие заданной плотности распределения, и выполняется обнаружение наблюдений, не принадлежащих к полученным кластерам. Наиболее широкое практическое применение в последние годы поиск аномалий получил при выявлении нетипичных фрагментов на основе спектральных

*Работа выполнена при поддержке Президиума РАН (проект № 15.3), Сибирского отделения РАН (интеграционный проект № 74) и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 11-07-00202, № 11-07-12083-офи-м-2011).

особенностей многоспектральных изображений [4, 5]. В представленной работе указанный подход используется для обнаружения малоразмерных динамических тепловых объектов по видеопоследовательностям ИК-диапазона.

Цель данной работы — создание программно-алгоритмических средств и исследование эффективности обнаружения малоразмерных динамических тепловых объектов на основе поиска пространственно-временных аномалий по последовательностям реальных изображений ИК-диапазона.

Алгоритм обработки данных. Назначением тепловизионных систем наблюдения является, как правило, обнаружение слабоконтрастных малоразмерных изображений объектов, но наличие даже незначительного аппаратного шума фотоприёмного устройства (ФПУ) приводит к ухудшению эффективности их функционирования. По этой причине на первом этапе обработки выполняются процедуры компенсации остаточной неоднородности приёмника (сохранившейся после штатных процедур коррекции) и подавления шумов.

Компенсация неоднородности осуществляется с учётом корректирующих коэффициентов чувствительности элементов ФПУ, рассчитанных на основе анализа изображений, сформированных в результате накопления нескольких кадров. Полагая, что вследствие наличия естественного движения камеры при наблюдении за сценой яркость накопленного изображения есть плавная функция от номера строки и столбца, для каждого элемента (i, j) вычисляется

$$K(i, j) = \left\langle \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} I(i, j, t) \right\rangle / \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} I(i, j, t), \quad (1)$$

где $I(i, j, t)$ — последовательность регистрируемых изображений; N — количество накапливаемых кадров; $\langle \cdot \rangle$ — определение медианы значений элементов в окрестности (размер (3×3) – (7×7) элементов в зависимости от параметров ФПУ). Значение каждого элемента (i, j) текущего изображения корректируется путём умножения на соответствующий коэффициент $K(i, j)$.

Шум ФПУ подавляется посредством многокадровой обработки данных с учётом взаимных общих смещений входных изображений (в целом) в последующих кадрах. При реализации данной процедуры относительные сдвиги по обеим координатам оцениваются сравнением центральных фрагментов $n - 2$ и $n + 2$ кадров видеопоследовательности (n — номер текущего кадра). Если смещение отсутствует, выполняется усреднение пяти кадров. При незначительном смещении (от 1 до 3 элементов разрешения) осуществляется его коррекция и усреднение трёх кадров. При наличии значительных смещений выполняется лишь медианная фильтрация в текущем кадре.

По сформированным видеопоследовательностям проводится поиск пространственно-временных аномалий (фрагментов нетипичных для такой сцены). Используемый подход основан на определении скользящим окном локальных признаков изображений (перечислены далее) и оценке статистических параметров распределений фрагментов фона по каждому из них. При этом оценка выполняется по всей совокупности данных, поскольку объекты интереса в поле зрения попадают достаточно редко и не оказывают существенного влияния на распределение значений признаков.

Тепловые объекты на ИК-изображениях характеризуются несколькими яркими (превышающими уровень близлежащего фона) отсчётами, и их примерные размеры, как правило, известны. Фоновая же составляющая более однородна. Поэтому в качестве критерия, подтверждающего гипотезу о наличии в центре анализируемого фрагмента обнаруживаемого объекта, следует использовать разность средних яркостей его центральной зоны ω и

периферии Ω :

$$F_1(x, y) = \frac{1}{N_\omega} \sum_{\omega(x, y)} I(x, y) - \frac{1}{N_\Omega} \sum_{\Omega(x, y)} I(x, y), \quad (2)$$

где x, y — пространственные координаты; I — яркость исходного изображения; N_ω и N_Ω — количество отсчётов центральной и периферийной зон. Кроме того, для изображений таких объектов характерно наличие значительных перепадов яркости. По этой причине информативным признаком является разность средних значений модуля пространственного градиента по центральной зоне фрагмента и по его периферии:

$$F_2(x, y) = \frac{1}{N_\omega} \sum_{\omega(x, y)} |\nabla I(x, y)| - \frac{1}{N_\Omega} \sum_{\Omega(x, y)} |\nabla I(x, y)|. \quad (3)$$

При этом размер центральной зоны должен соответствовать размеру изображений обнаруживаемых объектов, а для вычисления значений модуля пространственного градиента берётся оператор Собела с окном размером 3×3 элемента [6].

Для обнаружения малоразмерных динамических объектов при неизвестном движении системы наблюдения, наряду с перечисленными выше, предложено использовать признаки, рассчитанные аналогично (2) и (3) по разностным изображениям $S(x, y)$, сформированным путём вычитания из текущих кадров фоновой составляющей. Фоновую же составляющую предлагается оценивать с помощью эффективного вычислительного алгоритма, основанного на усреднении текущего и компенсированных по движению кадров и учитывающего временную и пространственную связность движения [7]. В данном алгоритме на стадии формирования фоновой составляющей определяется деформация фона от кадра к кадру путём сличения блоков и нахождения векторов движения. Для этого изображения разделяются на малые блоки (размером (8×8) – (16×16) пикселей) и для каждого из них в текущем кадре ищется наиболее подобный блок в предыдущем кадре. Относительное смещение этих блоков и задаёт вектор движения. Полученные векторы используются для формирования из предыдущих кадров серии компенсированных, соответствующих по времени текущему кадру. Это позволяет выполнять оценивание фоновой составляющей на основе совместного анализа нескольких изображений сцены (как минимум, пары компенсированных по движению и текущего) путём вычисления медианы их отсчётов. Вычитание полученного таким образом кадра из текущего позволяет подавить фон и выделить динамические объекты.

На основе разностных кадров $S(x, y)$ аналогично (2) и (3) находятся признаки

$$F_3(x, y) = \frac{1}{N_\omega} \sum_{\omega(x, y)} S(x, y) - \frac{1}{N_\Omega} \sum_{\Omega(x, y)} S(x, y), \quad (4)$$

$$F_4(x, y) = \frac{1}{N_\omega} \sum_{\omega(x, y)} |\nabla S(x, y)| - \frac{1}{N_\Omega} \sum_{\Omega(x, y)} |\nabla S(x, y)|. \quad (5)$$

Полагая, что для фрагментов, содержащих объекты интереса, значения введённых признаков максимальны по некоторой их окрестности, в полученных двумерных массивах $F_i(x, y)$, описывающих пространственное распределение признаков (2)–(5), выполняем обработку скользящим окном Ω . В результате этого определяются массивы локальных максимумов

$$M_i(x, y) = \begin{cases} F_i(x, y) & \text{при } F_i(x, y) > \max(F_i(x+k, y+l)), \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad k, l \in \Omega. \quad (6)$$

В массивах $M_i(x, y)$ рассчитываются среднее μ_i и среднеквадратичное отклонение σ_i ненулевых значений, т. е. находятся типичные для данной сцены параметры локальных максимумов значений признаков (формируется описание класса фон). Далее с помощью пороговой обработки вычисляются аномальные элементы массивов $M_i(x, y)$:

$$R_i(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{при } M_i(x, y) > \mu_i + n\sigma_i, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases} \quad (7)$$

Положение ненулевых элементов в бинарном массиве $R_i(x, y)$ соответствует координатам аномальных фрагментов (нетипичных для данного изображения) по i -му признаку на исходном изображении. Коэффициент n подбирается оператором в интерактивном режиме.

На заключительном этапе полученные массивы совмещаются:

$$P(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{при } R_1(x, y) \cup [R_2(x, y)]_\Omega \cup [R_3(x, y)]_\Omega \cup [R_4(x, y)]_\Omega, \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (8)$$

где $[\cdot]$ — логическое суммирование по окрестности Ω . При этом в каждом кадре также выполняется поиск цели, соответствующей наибольшему значению признака F_1 .

Таким образом, в результате поиска пространственно-временных аномалий по последовательности обрабатываемых изображений формируется бинарный массив $P(x, y)$ с метками о положении обнаруженных объектов в поле зрения системы наблюдения и выделяется среди них главная (первоочередная) цель.

Обнаружение объектов в реальной фоноцелевой обстановке. Для исследования эффективности предложенных алгоритмов обработки последовательностей изображений, ориентированных на обнаружение малоразмерных динамических тепловых объектов посредством поиска пространственно-временных аномалий, разработано специализированное программное обеспечение. Пакет программ состоит из запускаемого модуля, модулей обработки данных (в виде библиотеки динамической компоновки) и текстовых файлов с описанием последовательности процедур.

Программное обеспечение выполнено в среде Microsoft Visual Studio 2005 на языке C++. Запускаемый модуль обеспечивает чтение файлов с видеоданными различных форматов, представление исходных и сформированных данных на экране монитора, запись результатов обработки в видеофайл и в файлы формата bmp (для отдельных кадров), а также выбор и запуск функций обработки, ввод их параметров. Графический интерфейс программного приложения разработан на базе диалогового окна.

Исследование эффективности предлагаемых программно-алгоритмических средств выполнено на примере обработки видеопоследовательностей, полученных мобильной тепловизионной системой ТБ-4 (разработчик — Новосибирский филиал ИФП СО РАН «КТИ прикладной микроэлектроники») в реальных условиях при наблюдении движущихся транспортных средств на дальности 5,6 км. Система создана на основе болометрической матрицы с разрешением 640×480 элементов и имеет поле зрения $9 \times 6,8^\circ$. Следует отметить, что в зарегистрированных видеопоследовательностях наблюдаются постоянные незначительные смещения изображений от кадра к кадру (до 7 элементов разрешения), поскольку их регистрация осуществляется с подвижной платформы без жёсткой фиксации тепловизионной системы.

На рис. 1, *a* приведено одно из исходных изображений, а на рис. 1, *b* — его увеличенный фрагмент, содержащий несколько обнаруживаемых объектов. Средняя яркость изображения составляет 35,9 градации, СКО — 16,3, яркость обнаруживаемых объектов — от 60

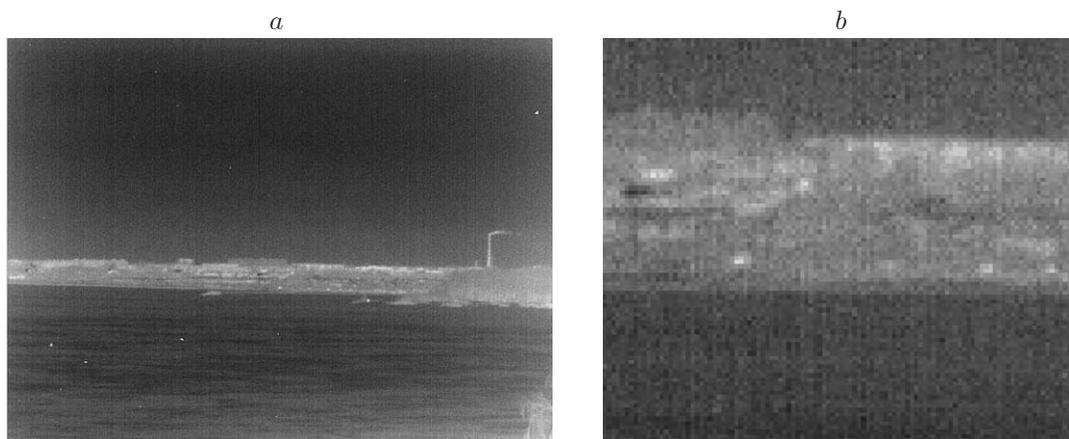


Рис. 1

до 90, при этом средняя яркость изображения наблюдаемой прибрежной территории — 56,9, а СКО — 12,3 и более 40 % отсчётов, соответствующих данной зоне, превосходят уровень 60 градаций. СКО шума, оценённое по однородной зоне изображения (фрагмент неба), равно 3,7 градации.

На рис. 2 показано это же изображение после этапа коррекции (СКО шума 1,8). Процедуры коррекции позволили устранить точечные дефекты на изображении и в значительной степени уменьшить влияние остаточной неоднородности ФПУ (проявляющееся в виде низкоконтрастной структуры).

На рис. 3 представлен результат поиска пространственно-временных аномалий для фрагмента, показанного на рис. 1, *b* (обнаруженные объекты отмечены маркерами в соответствии с положением ненулевых элементов в массиве $P(x, y)$).

Эффективность реализованного метода оценивалась путём расчёта количества найденных истинных и ложных целей при обработке последовательности длительностью 100 кадров. В качестве критериев эффективности принималось количество обнаруженных ложных целей на одну истинную, а также доля положительных решений (выбрана истинная цель) для всей последовательности при выделении главной цели.

В таблице приведены полученные результаты обнаружения при поиске пространственных, временных и пространственно-временных аномалий. Следует отметить, что поиск пространственных аномалий не позволяет эффективно решить задачу по выделению



Рис. 2

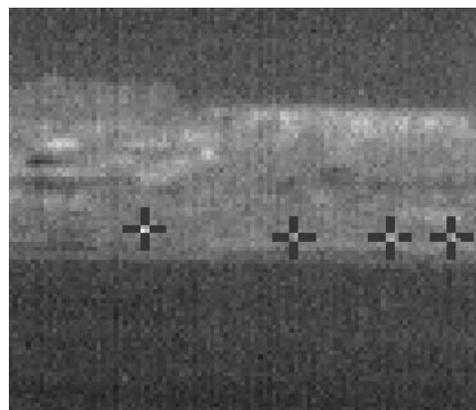


Рис. 3

Результаты обнаружения тепловых объектов по тестовой последовательности

Способы обнаружения	Количество ложных целей	Количество истинных целей	Количество ложных целей на одну истинную	Доля положительных решений при выделении главной цели
Пространственные аномалии	1410	276	5,1	0
Временные аномалии	246	260	0,95	0,46
Пространственно-временные аномалии	62	209	0,30	0,72

главной цели. Это обусловлено наличием в поле зрения объектов, соизмеримых по контрасту и размеру с обнаруживаемыми, например труба ТЭЦ, человек на ближнем плане и т. п. Поиск временных аномалий оказывается существенно эффективнее, но и при его применении не удалось решить поставленную задачу более чем на 50 % кадров. Это объясняется наличием ошибок в оценке блочных полей смещений при формировании компенсированных кадров, обусловленных существенными сдвигами изображений от кадра к кадру. При этом немаловажными факторами явились также низкий контраст и значительная однородность наблюдаемых изображений. Комбинированный же поиск пространственно-временных аномалий позволил достичь наиболее удовлетворительных результатов при обнаружении динамических тепловых объектов. Так, доля истинных целей в общем количестве выделенных оказалась $\sim 78\%$, при поиске же главной цели доля положительных решений для данной последовательности составила $\sim 72\%$.

Заключение. Для решения задачи обнаружения малоразмерных динамических тепловых объектов по видеопоследовательностям ИК-диапазона в данной работе предложено использовать подход, основанный на поиске пространственно-временных аномалий. Вычисление локальных признаков изображений при этом осуществлялось путём сравнения яркости и пространственного градиента яркости центральной и периферийной зон фрагментов. Созданы программно-алгоритмические средства обработки данных тепловизионных систем наблюдения, выполняющие коррекцию изображений и обнаружение объектов интереса с помощью поиска пространственно-временных аномалий. Исследования показали, что реализованный метод обеспечивает эффективность обнаружения динамических тепловых объектов в условиях реальной фоноцелевой обстановки на уровне 70–80 %.

Автор выражает благодарность сотрудникам Новосибирского филиала ИФП СО РАН «КТИ прикладной микроэлектроники» А. В. Голицыну и М. Ю. Цивинскому за сотрудничество при выполнении данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Roth P. M., Winter M. Survey of appearance-based methods for object recognition // Techn. Rep. ICG-TR-01/08. Institute for Computer Graphics and Vision, Graz University of Technology. Austria, 2008. 68 p. URL: http://lrs.icg.tugraz.at/pubs/roth_tr-icg_08.pdf (дата обращения: 12.03.2012).

-
2. **Chandola V., Banerjee A., Kumar V.** Anomaly detection: A survey // ACM Computing Surveys. 2009. **41**, N 3. Article 15. 58 p.
 3. **Грузман И. С., Киричук В. С., Косых В. П. и др.** Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учеб. пособие. Новосибирск: НГТУ, 2002. 352 с.
 4. **Huck A., Guillaume M., Oller G., Grizonnet M.** Comparison of local anomaly detection algorithms based on statistical hypothesis tests // Proc. of the 3rd Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing. 2011. 6080940.
 5. **Rees W. G.** Automated spaceborne detection of degraded vegetation around Monchegorsk, Kola Peninsula, Russia // Polar Record. 2012. **48**, N 1. P. 107–112.
 6. **Прэтт У.** Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. Т. 2. 480 с.
 7. **Борзов С. М., Потатуркин О. И.** Обнаружение малоразмерных динамических объектов подвижной системой наблюдения // Автометрия. 2012. **48**, № 1. С. 23–29.

Поступила в редакцию 12 марта 2012 г.
